RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

Office National des Forêts

rtm
restauration des terrains en montagne

INRAE

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE, DE LA BIODIVERSITÉ, DE LA FORÊT, DE LA MER ET DE LA PÊCHE
Liberté
Égalité
Fraternité

Changement climatique et phénomènes rocheux : Note de synthèse sur l'état des connaissances

Avril 2025

Historique de la diffusion

Version	Date	Commentaires
V1	23/05/2025	Version initiale

Rédacteur(s) et relecteurs

Rédacteurs	Relecteurs
Antoine Blanc (Référent CC - RTM 38) Robin Mainieri (RTM 38) Nicolas Eckert (INRAE) Rémy Martin (Référent Mouvement de terrain, Agence RTM des Alpes du Nord)	Yann Queffelean (Responsable technique national RTM, DRN-Pôle RTM) Pierre Verry (chef de service RTM 38)

Avant-propos

Ce travail a été financé par le ministère en charge de l'écologie, DGPR/SRN/SDAOH/BRNT (Direction Générale de la Prévention des Risques, Service des Risques Naturels, Sous-Direction des Aléas et des Ouvrages Hydrauliques, Bureau des Risques Naturels Terrestres), dans le cadre du programme de travail 2024.

Photos en couverture : Dépôts de l'écroulement de paroi en contexte de permafrost à la Roche d'Etache à Val-Cenis, 18 juin 2020 (ONF-RTM).

1. Cadre

Cette note de synthèse a été produite par l'ONF-RTM et l'INRAE dans le cadre du programme de travail 2024 financé par la DGPR. Elle synthétise les connaissances disponibles sur l'évolution des chutes de blocs, éboulements et écroulements (ci-après regroupés sous l'appellation « phénomènes rocheux ») dans le contexte du changement climatique. D'autres notes ont été produites pour d'autres phénomènes naturels en montagne générateurs de risques (phénomènes torrentiels, avalanches, glissements de terrain). **Une note générale présente le contexte dans lequel s'inscrit cette action ainsi que la méthodologie utilisée.**

2. Vue d'ensemble

Les études sur l'évolution des phénomènes rocheux dans le contexte du changement climatique **sont relativement peu nombreuses**. La connaissance actuelle reste donc encore limitée et repose en grande partie sur des hypothèses issues de la compréhension des mécanismes. Cette incertitude est particulièrement marquée pour le futur puisque les études quantitatives qui cherchent à déterminer l'évolution de l'activité rocheuse à partir de projections climatiques sont rares. Nous notons tout de même que la bibliographie est **plus abondante pour les zones concernées par la présence de permafrost** (haute montagne sous nos latitudes), que pour les zones de plus basse altitude.

D'un point de vue des observations du phénomène dans le passé, les bases de données disponibles sont **peu nombreuses**, souvent courtes en durée et incluent des biais. Les études s'appuyant sur ces observations s'intéressent principalement aux phénomènes ayant eu un impact (que nous appellerons évènement), et éventuellement à leur volume. L'évolution de la saisonnalité des évènements et des distances parcourues sont rarement étudiées.

3. Les phénomènes rocheux

Un phénomène rocheux se définit comme le départ d'une masse rocheuse depuis un escarpement (départ/initiation) et sa propagation sur une pente (propagation). Une terminologie différente est utilisée selon le volume du phénomène (guide MEZAP, volume retenu pour caractériser l'intensité du phénomène) :

- Chute de blocs : moins de 100 m^3 ;
- Eboulements : 100 m^3 à 1 Mm^3 ;
- Ecroulements : plus de 1 Mm^3.

Cette note traite exclusivement de l'impact du changement climatique **sur l'initiation du mouvement des masses rocheuses.** L'impact potentiel du changement climatique sur la propagation est plus indirect : modification de la couverture forestière, ou plus largement modification de l'état de surface et des propriétés du sol. Néanmoins la littérature reste très limitée sur ces sujets. Nous rappelons ci-dessous les principaux facteurs à l'origine de la déstabilisation d'une masse rocheuse, avant d'aborder les effets du changement climatique.

La stabilité d'une masse rocheuse dépend plus des faiblesses dans la structure de la roche (joints, failles) que de la résistance intrinsèque de la roche. La susceptibilité d'une masse rocheuse à produire des chutes de blocs est donc en premier lieu déterminée par la géologie, les prédispositions structurelles et la topographie. Les conditions météorologiques constituent des facteurs externes pouvant précipiter une déstabilisation, au même titre que les tremblements de terre, le développement des systèmes racinaires et leur mouvement (effet du vent sur les arbres), ou les activités anthropiques. **Plusieurs facteurs peuvent ainsi intervenir à la fois dans l'initiation du mouvement d'une masse rocheuse et dans la manière dont le volume se mobilise (que ce soit de façon fragmentée ou en un seul bloc), ce qui influence directement l'intensité du phénomène et les dommages potentiels.** Le changement climatique, qui se traduit par des évolutions des température et des régimes de précipitations, est susceptible d'influencer l'activité rocheuse dans les zones

pour lesquelles les prédispositions sont favorables à ce type de phénomène.

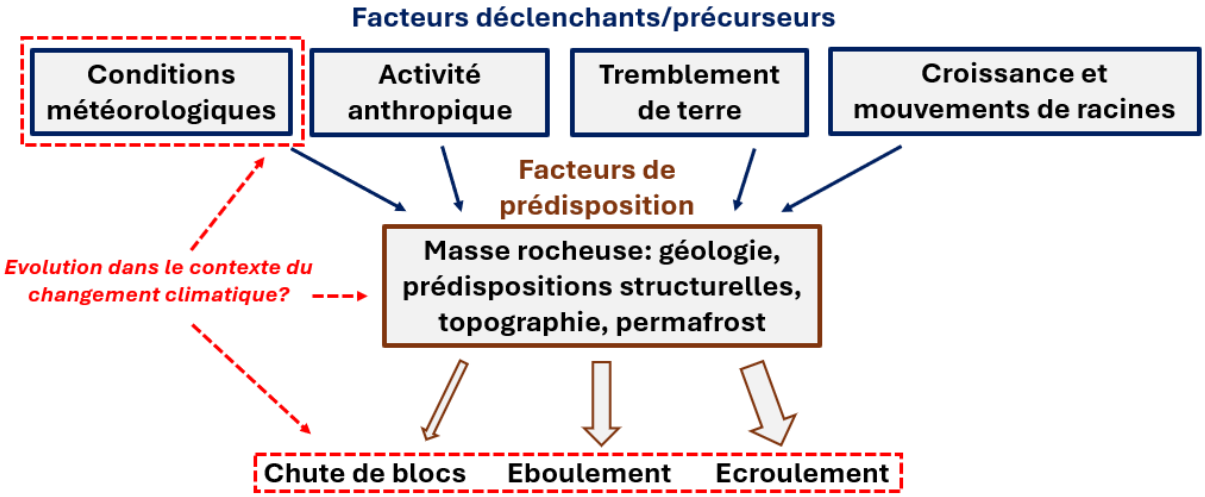

Figure 1 : Schéma simplifié des facteurs de prédisposition et précurseurs des phénomènes rocheux

Si la gravité est le moteur principal du départ d'une masse rocheuse puis de sa propagation, d'autres facteurs peuvent contribuer à l'initiation du départ :

- **Les pressions hydrostatiques** : pression résultant de la présence d'eau dans les fractures, liée à la disponibilité en eau liquide et à la perméabilité de la roche. Les apports en eau liquide sont dépendants du régime des pluies et de la fonte nivale ;
- **Les pressions cryostatiques** : variations de pression liées à la formation de glace dans les fractures, liées à la disponibilité en eau liquide, aux gammes et gradients de température, et à la perméabilité de la roche. La présence de glace peut être liée à un gel permanent (permafrost) ou intermittent (cycles gel/dégel) ;
- **L'expansion/contraction de la roche :** phénomène thermique lié à des fluctuations répétées de température ;
- **Les déplacements/vibrations** induits par un séisme ou à une échelle moindre par l'activité humaine ou animal ;
- **Les pressions liées à la végétation :** à faible profondeur, aux altitudes où les arbres sont présents, la croissance des racines peut ouvrir des fissures et favoriser les infiltrations d'eau. Le mouvement des racines lors d'un épisode de vent peut aussi servir de déclencheur à une chute de blocs.

En parallèle, les facteurs qui tendent à stabiliser les parois sont :

- **La résistance intrinsèque de la roche** au frottement et à la rupture ;
- **La résistance de la glace** (si présente) au frottement et à la rupture et la résistance aux contraintes mécaniques **aux interfaces glace/roche ;**
- Le renfort **par les systèmes racinaires** (double effet de la végétation, qui peut évoluer avec le temps).

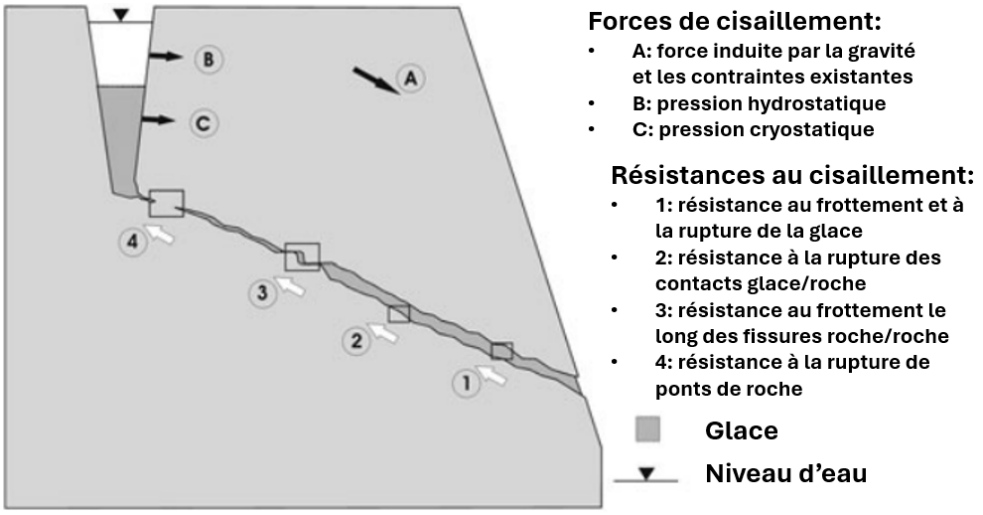

Figure 2 : Principales forces de cisaillement et résistances à ces forces au sein d'une paroi rocheuse (adapté de la Figure 1 de Kraublatter et al., 2013)

Les facteurs de prédispositions de la roche (géologie, structure, topographie) conditionnent sa perméabilité, sa résistance à la rupture/frottement et sa sensibilité aux fluctuations thermiques. Un facteur de prédisposition spécifique aux zones froides est **la présence de permafrost** (pergélisol en français), qui influence les propriétés mécaniques et hydrologiques de la roche. Il convient donc de distinguer **la haute montagne**, considérée ici comme la zone où les terrains sont susceptibles d'être gelés en permanence à une certaine profondeur (altitude généralement supérieure à 2700 m/3000 m en France métropolitaine).

Nous présentons ci-dessous l'état des connaissances sur l'évolution des phénomènes rocheux dans le contexte du changement climatique en abordant :

- **Les processus physiques** et les facteurs précurseurs impliqués (approche mécanique, analytique) ;
- **Les données d'observation du phénomène** (approche observationnelle, statistique).

Dans les deux cas, un focus particulier est fait pour la haute montagne.

4. Evolution au regard des processus/précurseurs

4.1. Processus actifs à toutes les gammes d'altitude

Plusieurs études suggèrent un lien entre **les cycles de gel/dégel** et la fréquence des départs. Néanmoins, les tendances sur l'activité des phénomènes rocheux en lien avec l'évolution de ces cycles n'est pas clairement établie. **Les précipitations** sont aussi identifiées comme un précurseur à la déstabilisation, avec cependant une caractérisation variée selon les études : précipitations le jour de l'évènement, seuil d'intensité de précipitations (ex : >5mm/h), précipitation saisonnière ou encore cumul annuel. Toutefois, comme pour les cycles de gel/dégel, l'évolution de l'activité de chute de blocs en lien avec l'évolution des régimes de précipitations n'est pas clairement établie. Cela est aussi lié au fait que l'évolution des régimes de précipitations est associée à des incertitudes importantes.

D'un point de vue des précurseurs climatiques, il est à noter que les effets conjoints de la diminution des cycles de gel/dégel et de l'augmentation de l'intensité des précipitations (selon la théorie) **peuvent être susceptibles de se compenser.** Une étude sur l'évolution future des chutes de blocs hors zone affectée par le dégel du permafrost en Allemagne suggère que la diminution du nombre de cycles de gel/dégel prédominerait, rendant moins nombreuses les situations météorologiques favorables au phénomène. Une étude sur une paroi rocheuse au Canada suggère des changements de saisonnalité et des phénomènes de plus petits volumes à l'avenir en lien avec une pénétration du gel à des profondeurs moins importantes dans la roche.

4.2. Spécificités de la haute-montagne

En haute montagne, la présence de permafrost et sa dégradation est un facteur supplémentaire à considérer dans les précurseurs à un phénomène rocheux. Le poids respectif des différents facteurs étant affectés par le réchauffement en cours (cycles gel/dégel, précipitations, dégradation du permafrost) n'est pas quantifié, mais un consensus existe sur le fait que la dégradation du permafrost tient une place prépondérante dans les facteurs précurseurs aux déstabilisations.

Le permafrost (ou pergélisol en français) est un état thermique. Il est défini comme une portion de sous-sol dont la température est inférieure à 0°C tout au long de l'année. La partie gelée en permanence est surmontée d'une « couche active » qui dégèle chaque année. Dans les Alpes, les zones concernées par la présence de permafrost se situent essentiellement au-dessus de 2700 m en face nord et 3000 m en face sud.

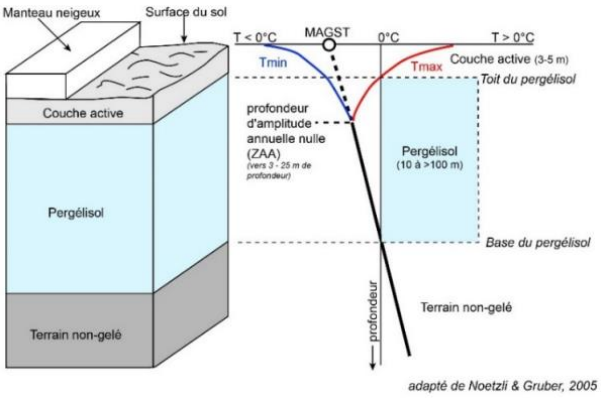

Figure 3 : schéma conceptuel d'une paroi à permafrost (adapté de Noetzli&Gruber, 2005)

Le réchauffement de l'air en cours (marqué depuis les années 1980) entraine une dégradation du permafrost, qui se traduit par un approfondissement de la couche active et un réchauffement du pergélisol sous-jacent. Cette évolution est largement observée dans les Alpes françaises au cours de la dernière décennie. Lorsque de la glace est présente dans les discontinuités d'une roche, le réchauffement tend à réduire la résistance de la glace à la déformation et à la rupture, et à réduire la résistance des contacts roche/glace. En parallèle du réchauffement de la glace en profondeur, une disparition partielle de glace peut laisser place à de l'eau liquide piégée par la glace sous-jacente, ce qui peut favoriser des déstabilisations par augmentation des pressions hydrostatiques. Ces nouvelles infiltrations d'eau favorisent également des échanges de chaleur plus rapides que par simple conduction dans le sol, ce qui peut entrainer une dégradation plus rapide du permafrost. Néanmoins, le retrait total de la glace peut aussi permettre un meilleur drainage des eaux. Cette forte sensibilité du permafrost au réchauffement en cours semble s'appliquer principalement à des profondeurs limitées, généralement inférieures à 20 mètres. Cependant, des observations récentes suggèrent un réchauffement important à de fortes profondeurs (+0.2°C en 2024 sur le forage de la Grande Motte à 20 mètres de profondeur).

Par ailleurs, une roche récemment mise à nue suite au retrait glaciaire est soumise à des fluctuations de température plus importantes, ce qui permet la création d'une couche active. Le retrait d'un glacier fait aussi disparaitre une contrainte stabilisatrice et **favoriser des chutes de blocs et éboulements immédiats lorsque les masses rocheuses sont déjà déstructurées.**

Enfin, une fonte précoce et rapide de la neige, notamment à la fin du printemps, peut accentuer le dégel de la couche active et la fonte de la glace dans les fractures. Les effets semblent doubles : réduction de la résistance au cisaillement et augmentation de la force de cisaillement sous l'effet d'une pression hydrostatique plus élevée liée à l'eau de fonte dans les fissures.

Plusieurs études mettent en avant que les profondeurs importantes (typiquement plus de 20 mètres), sont affectées sur le temps long par **le retrait glaciaire** (perte des contraintes exercées par le glacier) et par **le réchauffement** (baisse de la résistance mécanique des roches) qui peuvent permettre la création de nouveaux plans de rupture. Ces modifications

profondes sont celles qui peuvent conduire à des phénomènes de volume conséquents (écroulements). Ces dynamiques **en cours depuis le Dernier Maximum Glaciaire** (environ 20 000 ans) ne concernent pas uniquement les zones de permafrost actuelles puisque les glaciers couvraient l'essentiel des Alpes et des Pyrénées lors de la dernière glaciation. Elles ont conduit à de grands écroulements mais également à de grands mouvements de versant (assimilés à des glissements) parfois encore actifs. Ces phénomènes auront tendance à remonter de plus en plus haut en altitude et de nouvelles zones apparaitront certainement. Ces phénomènes de gros volumes sont très complexes et la compréhension des mécanismes est limitée.

En résumé, la dégradation du permafrost et le retrait glaciaire en haute-montagne accroissent les facteurs déstabilisants. A l'avenir, cette tendance va se poursuivre dans le contexte du réchauffement, et concerner **des altitudes de plus en plus hautes.** L'effet du permafrost sur la fréquence de départ est **transitoire** (effet nul quand le dégel sera complet) mais peut durer plusieurs siècles (réponse au réchauffement du permafrost plus lente que les glaciers).

5. Evolution observée du phénomène

5.1. Evolution aux différentes gammes d'altitude

Les bases de données fournissant un recensement des phénomènes rocheux (ou une reconstruction par un travail d'archive/d'analyse des traces d'évènements passés sur le terrain) sur le temps long **sont rares, et les études sont peu nombreuses.** L'exploitation des bases de données existantes (observations ou reconstructions) dans les Alpes européennes **ne permet pas à ce stade d'aboutir à une tendance claire sur l'évolution de l'occurrence du phénomène (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).**

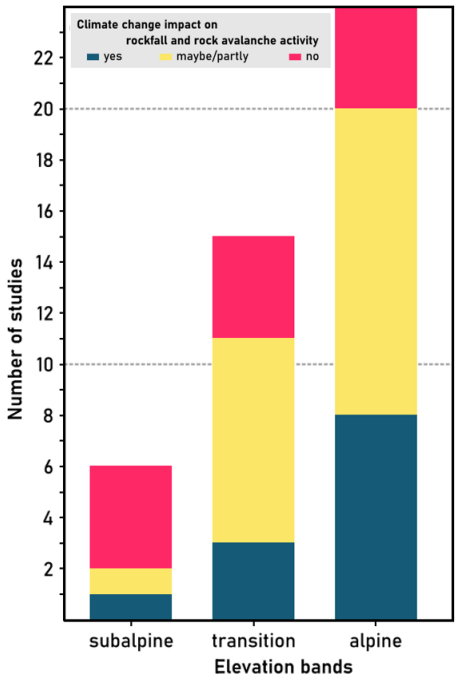

Figure 4 : Adaptation de la Figure 10 de la synthèse bibliographique de Jacquemart et al. (2024) pour l'activité rocheuse en basse, moyenne et haute altitude.

Attention, les études qui ne mettent pas en avant d'impact du changement climatique ne signifient pas nécessairement que le lien est inexistant. Il traduit simplement qu'aucune tendance n'a été mise en évidence.

Par exemple, l'analyse de chroniques de chutes de blocs reconstituées **dans le massif du Vercors et dans le Diois sur plus de 60 ans** n'a pas mis en évidence de tendance sur la fréquence des phénomènes rocheux, malgré une dépendance de la variabilité décennale des chutes de blocs au nombre de cycles de gel/dégel et aux précipitations.

5.2. Evolution en haute montagne

A l'échelle globale, selon le GIEC, **il existe un niveau de confiance élevé au regard de l'augmentation de l'activité de chute de blocs et d'éboulement au cours des 50 dernières années dans les zones de montagne où le permafrost se dégrade.** Cette tendance est observée dans le massif du Mont-Blanc et dans les Alpes européennes surtout depuis les années 2000, avec une accélération marquée depuis 2015. Dans le massif du Mont-Blanc, cette augmentation s'applique à toutes les gammes de volumes des évènements observés, dans une tranche 1 – 65 000 m^3, avec des plans de rupture situés au maximum à 15 m de profondeur. **Les évènements de faible volume (< 10^5 m^3) sont principalement observés en été**, et une bonne corrélation est observée avec les températures (forte activité en période chaude). Au-delà de l'impact direct du réchauffement sur la dégradation du permafrost, d'importantes activités d'éboulements ont été documentées **dans des zones nouvellement déglacées du fait de la mise à nu de matériaux mobilisables.**

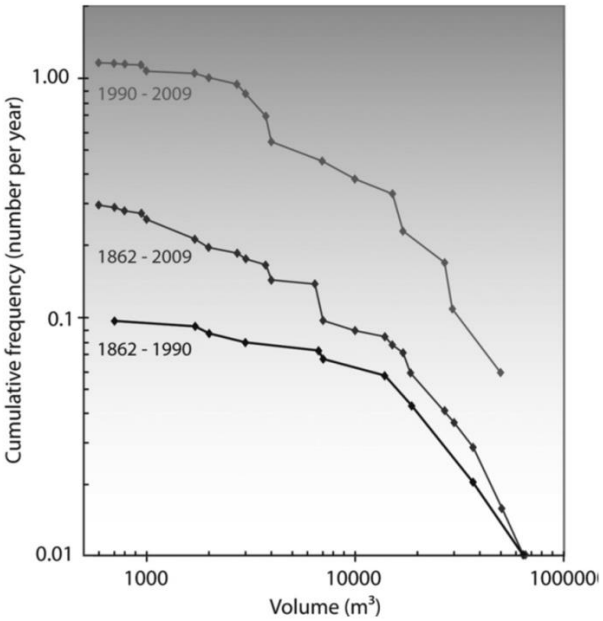

Figure 5 : Evolution de la fréquence de phénomènes rocheux en fonction de leur gamme de volume pour 3 périodes différentes (Ravanel and Deline, 2011)

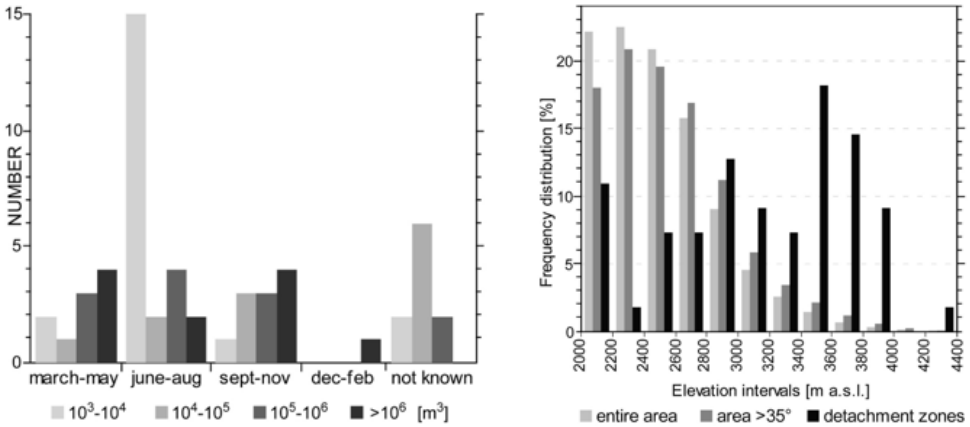

Figure 6 : Saisonnalité et altitude de 56 évènements de chute de blocs/éboulement/écroulement observés à plus de 2000 m d'altitude entre 1901 et 2007 dans les Alpes Centrales (adaptation des Figure 5 et 6 de Fischer et al., 2012). Gauche : les évènements inférieurs à 10 000 m3 sont principalement observés en été alors que la saisonnalité des évènements de plus gros volume est moins marquée. Droite : les évènements sont observés principalement en zones de haute altitude (barres noires), qui représentent pourtant une faible superficie de la zone d'étude (barres gris clair).

Les écroulements (> 1Mm^3) sont eux observés **en toute saison et n'ont pas nécessairement lieu en contexte de permafrost.** En contexte de permafrost, plusieurs gros écroulements ont été récemment observés au printemps dans les Alpes. Cependant, l'évolution de la fréquence de ces phénomènes dans le contexte du changement climatique est très incertaine (peu d'observations) même si des hypothèses sont faites sur le lien entre ces gros écroulements récents et la dégradation du permafrost en profondeur qui modifie la résistance des roches et peut favoriser des infiltrations d'eau.

6. Synthèse

Le départ d'une masse rocheuse depuis un escarpement est lié à **plusieurs facteurs.** Les facteurs de prédisposition d'un départ sont en premier lieu liés **à la géologie, aux caractéristiques structurelles et à la topographie.** Les conditions météorologiques - qui évoluent dans le contexte du changement climatique - constituent des facteurs précurseurs de départ au même titre que d'autres facteurs externes (activités humaines, tremblement de terre, végétation…).

Dans ce contexte, il est essentiel de s'appuyer sur **les chroniques d'évènements observés ou reconstitués** pour d'une part quantifier/qualifier l'effet du changement climatique et pour d'autre part comprendre les processus à l'œuvre dans l'occurrence des chutes de blocs, éboulements et écroulements. Les observations sur le temps long et à l'échelle régionale sont limitées, et leur qualité impose des méthodes statistiques permettant de s'affranchir des biais liés à des évolutions non climatiques (biais de source, influence anthropique). Ces méthodes ne sont pas encore totalement opérationnelles.

D'un point de vue des processus/précurseurs, nous retenons de cette synthèse les points suivants :

1) Les précurseurs météorologiques à une déstabilisation sont identifiés **(cycles gel/dégel, précipitations**) mais caractérisés de manière variée. Les incertitudes sur le lien phénomène rocheux/précurseurs, les incertitudes sur les évolutions futures des précurseurs (principalement précipitations), et les effets potentiellement compensatoires de ces évolutions **ne permettent pas d'aboutir à une image claire sur les tendances attendues sur les phénomènes rocheux en lien avec l'évolution de ces précurseurs météorologiques ;**

2) En haute montagne, **la dégradation du permafrost et le retrait glaciaire** s'ajoutent aux autres facteurs et constituent des facteurs de déstabilisation de masses rocheuses prédominants là où la géologie, la structure et la pente le permettent ;

3) Les écroulements (>1 Mm^3) **répondent à des évolutions sur plusieurs millénaires** (réchauffement, retrait glaciaire) qui affectent la roche en profondeur, que ce soit aux altitudes basses/intermédiaires ou en haute montagne. Il n'existe pas de consensus sur l'évolution attendue de la fréquence de ces phénomènes en lien avec la dégradation **rapide** du permafrost.

D'un point de vue des observations du phénomène, nous retenons les points suivants :

1) **En l'absence de permafrost, il ne semble pas y avoir de tendance significative dans la fréquence des chutes de blocs/éboulements en lien avec le contexte du changement climatique en cours.** Cela peut être lié au fait que i) les données et méthodes existantes ne permettent pas d'identifier une tendance statistiquement significative, ou ii) qu'il n'existe effectivement pas de tendance.

2) **A l'échelle globale et à l'échelle des Alpes, une augmentation de la fréquence des chutes de blocs et des éboulements dans les zones où le permafrost se dégrade est observée.** Les évènements de volumes limités sont principalement observés en réaction à des périodes chaudes pendant la période de fonte. Les évènements de plus gros volume sont observés en toute saison.

3) En contexte de permafrost, l'origine des écroulements récents de gros volumes ayant eu lieu au printemps (infiltrations d'eau de pluie et de fonte) est questionnée.

Cependant ici encore, **le nombre limité d'observations** empêche actuellement d'attribuer clairement ce type de phénomène au changement climatique.

Le changement climatique a déjà des effets significatifs et avérés sur les phénomènes rocheux en haute montagne, mais la connaissance est plus limitée et les évolutions moins marquées aux altitudes plus basses (là où les enjeux sont les plus nombreux) et pour les écroulements de gros volumes (qui sont les phénomènes qui peuvent causer le plus de dommages). Dans ce contexte, **l'observation des phénomènes est une source « certaine » de données pour améliorer la connaissance**. Elle reste l'approche la plus fiable et la plus robuste au regard d'approches plus analytiques (compréhension mécanique de tous les processus du phénomène).

7. Références mobilisées pour la rédaction de cette note

Birien et al. (2024). **Global warming impacts on rockfall frequency and magnitude due to changing frost distribution and frost cracking effectiveness.** Earth Surface Processes and Landforms, https://doi.org/10.1002/esp.5913

BRGM et al. (2021). **Guide technique MEZAP: caractérisation de l'aléa rocheux dans le cadre d'un PPR ou d'un PAC.** https://www.brgm.fr/fr/actualite/actualite/chute-pierres-guide-technique-alea-rocheux

Cimelière FL (2022). **Rapport de stage: Cartographie de l'exposition aux phénomènes d'effondrements de parois à permafrost dans les Alpes françaises.** Service de Restauration des Terrains de l'Isère

Fischer et al. (2012). **On the influence of topographic, geological and cryospheric factors on rock avalanches and rockfalls in high-mountain areas.** Natural Hazards and Earth System Sciences, https://doi.org/10.5194/nhess-12-241-2012

Hock et al. (2019). **High Mountain Areas. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner et al.].** Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 131-202. https://doi.org/10.1017/9781009157964.004

INRAE (2022). **ALEACLIM : Réponse des aléas de montagne au changement climatique.** Programme MTECT (DGPR/SRNH) : Connaissance et prévention des risques naturels et hydrauliques.

Jacquemart et al. (2024). **Detecting the impact of climate change on alpine mass movements in observational records from the European Alps.** Earth Science Reviews, https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104886

Krautblatter et al. (2013). **Why permafrost rocks become unstable: a rock-icemechanical model in time and space: A ROCK-ICE-MECHANICAL MODEL FOR PERMAFROST ROCKS.** Earth Surf. Process. Landforms, https://doi.org/10.1002/esp.3374

Magnin et al. (2023**). Main results of permafrost monitoring in the French Alps through the PermaFrance network over the period 2010–2022.** Permafrost and Periglacial Processes, https://doi.org/10.1002/ppp.2209

Maineri et al. (2023). **Limited impacts of global warming on rockfall activity at low elevations: Insights from two calcareous cliffs from the French Prealps.** Progress in Physical Geography: Earth and Environment, https://doi.org/10.1177/03091333221107624

Nissen et al. (2023). **A decrease in rockfall probability under climate change conditions in Germany.** Natural Hazards Earth System Science, https://doi.org/10.5194/nhess-23-2737-2023

Ravanel et al. (2010). **Rock falls in the Mont Blanc Massif in 2007 and 2008.** Landslides, https://doi.org/10.1007/s10346-010-0206-z

Ravanel et al. (2017). **Impacts of the 2003 and 2015 summer heatwaves on permafrost-affected rock-walls in the Mont Blanc massif.** Science of the Total Environment, http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.055

Sass and Oberlechner (2012). **Is climate change causing increased rockfall frequency in Austria?** Natural Hazards Earth System science, https://doi.org/10.5194/nhess-12-3209-2012